

冻融条件下土壤水分和速效磷垂直迁移规律

周丽丽, 马世伟, 米彩红, 李婧楠

(沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110866)

摘要:中国东北地区土壤普遍受到的季节性冻融作用会影响土壤中速效磷和水分的垂直分配。通过室内模拟冻融环境,分析了冻融循环条件下黑土速效磷和土壤水分的垂直变化。结果表明:多次冻融循环作用使土壤速效磷随着土壤水分由下层向表层迁移,经30次冻融循环作用后土壤最大含水率和土壤最大速效磷含量均出现在3 cm层;土壤初始含水率越高,冻融作用后向土壤表层迁移的速效磷含量越大,但随着冻融循环次数增加,土壤各层速效磷含量都有所下降,1次冻融作用后,土壤速效磷的最高含量为50.63 mg/kg,30次后最高含量为43.81 mg/kg,减少了13.5%;利用多元回归分析分别得出了冻融循环后土壤含水率和速效磷与初始含水率、冻融循环次数和土层深度的关系函数,相关系数分别为0.892,0.578。上述研究成果为季节性冻融区非点源污染及土壤盐碱化防治奠定理论基础。

关键词:冻融作用; 含水率; 磷素迁移; 黑土

中图分类号:S152.7;X144

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)03-0070-05

Soil Moisture and Available Phosphorus Vertical Movement Law Under the Freezing and Thawing Condition

ZHOU Lili, MA Shiwei, MI Caihong, LI Jingnan

(College of Water Conservancy, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Soil is generally influenced by seasonal freeze-thaw cycle in northeast of China, which makes available phosphorus and moisture move and redistribute. The indoor simulated freezing and thawing environments were explored to investigate the available phosphorus and moisture vertical movement under freezing and thawing condition. The results showed that the soil available phosphorus, below the frozen layer, moved up with soil moisture under multiple freeze-thaw cycles; and after 30 times of successive freeze-thaw cycles maximum moisture content moved up and appeared below 3 cm of layer; the higher initial soil moisture, migrating to the upper layer of soil available phosphorus was higher after freeze-thaw cycles. But with increase of number of freeze-thaw cycles the soil available phosphorus content decreased. After one freeze-thaw cycles, the highest content of soil available phosphorus was 50.63 mg/kg. After 30 times of successive freeze-thaw cycles, the maximum content of soil available phosphorus was 43.81 mg/kg, reduced by 13.5%. The authors established the relational function between soil moisture content and available phosphorus with the initial moisture content, freeze-thaw cycles and soil depth, respectively, by the method of multiple regression analysis, and the coefficients of correlation respectively were 0.892 and 0.578. This research results will lay a foundation for preventing the non-point source pollution and soil salinization.

Keywords: freeze-thaw action; phosphorus movement; moisture content; black earth

寒冷地区土壤速效磷和水分在垂直剖面上的迁移与土壤冻融的关系十分密切。研究表明,冻融作用可改变土壤结构和含水量分布,增强土壤释水性和水分渗透性,使融化后的土壤水分含量显著提高,养分易于溶出或通过各种途径包裹在矿物颗粒内或吸附于土壤胶体表面随水流迁移,造成土壤中营养物质的

流失^[1]。周旺明等^[2]通过研究发现,冻融过程增加了土壤淋溶液中总磷和磷酸根浓度和流失量,表明冻融作用提高了土壤淋溶液中磷的浓度,促进了磷的流失。Himan^[3]发现,对于由土壤矿物质和土壤团聚体内冰晶生成时产生的破碎效应所形成的矿质土壤,经过单一或重复冻融循环作用,碳酸氢盐提取磷的质量

分数会有所提高^[4]。Ronvaz等^[5]在可控土壤培养条件下,发现溶解磷总量随着冻融循环次数的增加而增大。磷是土壤盐分的主要组成部分,并以土壤中水分迁移为主要驱动力,在土壤中形成垂直方向的迁移。已有研究发现,冻融条件下土壤中水分的运移和由水分运移所引起的盐分运移是发生冻害和土壤盐碱化的重要原因^[6-7]。本研究选取东北黑土为试验土壤,通过模拟冻融条件,研究不同初始含水率条件下土壤速效磷和水分垂直迁移特性,为进一步揭示冻融作用及含水率影响土壤速效磷迁移机制提供支持,为合理预测因冻融作用产生的侵蚀及磷素迁移、防止非点源污染和土壤盐碱化奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 土样采集

试验用土采集于黑龙江省北安市二井镇(48°21'8"N, 126°33'23"E),该地为我国东北典型黑土区,土壤最大冻结深度一般为2.2 m左右。试验取耕层土壤,实测饱和含水率高达55.76%,容重为0.9 g/cm³,土壤pH值为5.85,速效磷(AP)量为20.94 mg/kg,全磷(TP)量为902.20 mg/kg。取回后,将土样置于阴凉处自然风干,过5 mm×5 mm筛,剔除植物根系等杂物。

1.2 土柱填充

结合《土工试验标准方法》中扰动土试样的制作步骤(GB/T50123—1999),最终确定以下试样制备方案,可以保证土壤含水量在土柱中均匀分布,具体方法如下:模拟用的土柱管为直径5 cm、高50 cm的PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯,俗称有机玻璃)。将以上采集的土样平铺于搪瓷盘内。根据填土量和要设定的速效磷背景值(60 mg/kg)计算出所需要磷的量,通过所配置的KH₂PO₄溶液均匀地用喷壶喷洒到土壤中,充分拌匀后,进行闷料24 h。测定速效磷含量,选取三点,测速效磷含量使其与要求的60 mg/kg之差不得大于±1%。再根据要制备的初始含水量(20%,30%,40%)计算出所需要在土壤中添加水的质量,用喷壶均匀喷洒,再进行闷料24 h,同样取三点,测试样的含水率与要求的含水率之差不得大于±1%。采用击样法制备扰动土试样,根据试样筒容积、含水量计算每个试样所需的湿土质量,将湿土分层装入PMMA试样筒中,通过控制每层土样的击实次数和击后高度来保证试样的均匀性,控制容重为0.9 g/cm³。试验中设计3次重复,即设定冻融循环结束后,保证每个处理取土柱为3个,所以土柱填充时每个含水率处理应该设定重复15个。

1.3 冻融试验

本试验采取的是无外界水源补给的封闭系统试验。在野外田间土壤自上而下冻结或融化,所以在土柱底部和四周包裹2 mm厚的LDPE(低密度聚乙烯,俗称珍珠棉)2层,在LDPE外侧采用25 mm厚的聚苯乙烯保护套包裹,对土柱进行隔温防护,放入冻融循环仪,确保土样自上而下冻融。试验时,分别将制备的不同初始含水率土柱放入冷冻箱,由温控仪调节冷冻箱的温度,在-10℃条件下冷冻12 h,在7℃条件下解冻12 h,循环次数为1次(1 FTC),5次(5 FTCs),10次(10 FTCs),20次(20 FTCs)和30次(30 FTCs)。设定冻融循环结束后,将土柱从冻融循环仪中取出,去掉包裹层。在土柱外侧分别量出距表层1 cm,3 cm,5 cm,7 cm,10 cm,15 cm,20 cm,30 cm,40 cm和50 cm处,做标记。用专用刀将土柱直接切分进行取样。一部分土样用烘干法立即测量含水率,为质量含水率。另一部分土样自然风干后,用NaHCO₃浸提,钼锑抗比色法^[8]测定速效磷含量。

2 结果与分析

2.1 冻融作用对土壤水分垂直迁移的影响

冻融循环条件下土壤水分垂直迁移变化见表1。土壤初始含水率20%,30%和40%经过1次冻融循环后分别在距离表层15 cm,7 cm和15 cm处达到最大含水率,为20.0%,27.6%和34.7%。5次冻融循环后最高含水率分别出现在距表层7 cm,7 cm和10 cm处,为19.6%,27.7%和40.0%。经过连续30次冻融循环后,土壤最高含水率均出现在距离表层3 cm处,分别为22.0%,28.2%和36.8%。经过冻融循环后各层土壤含水率平均值也在距离表层3 cm处达到最大,为26.6%。对土壤各层含水率进行方差分析,结果见表1。随着冻融循环次数增加,土壤最大含水率与各层含水率多数达到显著差异($p < 0.05$),其中未达到显著差异的为与最大含水率相邻的土层。冻融循环过程使得土壤下层水分向上层迁移,显著增加了上层水分含量,这会春季融雪水的下渗,加剧春季融雪侵蚀。

土壤水分可在水势梯度、压力梯度、温度梯度、溶质浓度梯度及电场梯度等各种物理化学过程引起的力场作用下发生迁移^[6]。在冻结期,随着温度降低,土壤开始从表层向下冻结,冻土层下界面处土壤水势较小,而冻结面之下未冻土壤的水势较大^[9],所以下层未冻土壤水分向冻土层下界面运移、积蓄,造成土壤水分向上迁移;因冻胀的原因土壤颗粒之间孔隙加大,也为下层水分向上迁移提供了便利性。1次冻融

后分别在 15 cm, 7 cm 和 15 cm 处达到最大含水率, 在下次冻结开始, 下层未冻水分在水势作用下继续向上层迁移并冻结。在冻融期, 由于外界温度升高土壤开始由表层向下解冻, 消融的土壤水分向下迁移, 但土壤下部未解冻层阻碍了土壤水分向下迁移而形成上层滞水^[10], 结果导致迁移至上层的水分通过渗

透作用反迁至底层的量要小于冻结期上移量。因此随着反复的冻融作用, 土壤水分逐渐由下层向表层移动, 5 次冻融循环后最大含水率分别出现在 7 cm, 7 cm 和 10 cm 处。虽初始含水率不同, 经过多次冻融循环后土壤最大含水率均出现在表层 3 cm 处。冻融循环促进了土壤水分向上层运移。

表 1 冻融循环条件下土壤含水率垂直分布

土层 深度/cm	20%					30%					40%				
	1FTC	5FTCs	10FTCs	20FTCs	30FTCs	1FTC	5FTCs	10FTCs	20FTCs	30FTCs	1FTC	5FTCs	10FTCs	20FTCs	30FTCs
1	0.175cde	0.173bc	0.167b	0.222ab	0.205ab	0.232cd	0.244b	0.208e	0.270cd	0.233c	0.284d	0.343c	0.351b	0.31b	0.327bc
3	0.167de	0.184ab	0.154b	0.237a	0.220a	0.221def	0.264a	0.244c	0.289ab	0.282a	0.298c	0.328c	0.34b	0.395a	0.368a
5	0.172cde	0.158cd	0.14b	0.196bc	0.205ab	0.216f	0.239b	0.270a	0.298a	0.234c	0.324b	0.361ac	0.409a	0.321b	0.355b
7	0.189bc	0.196a	0.212a	0.159e	0.152f	0.276a	0.277a	0.240c	0.259de	0.225c	0.298c	0.325c	0.400a	0.316b	0.364ab
10	0.161e	0.181ab	0.16b	0.192cd	0.196bc	0.259b	0.212c	0.218de	0.236f	0.244c	0.322b	0.400a	0.333b	0.333b	0.333b
15	0.200a	0.185ab	0.149b	0.169de	0.180cd	0.228de	0.236b	0.253a	0.213g	0.262b	0.347a	0.347c	0.325bc	0.341b	0.343b
20	0.193ab	0.156cd	0.167b	0.196bcd	0.164def	0.216f	0.196d	0.245c	0.245ef	0.267b	0.279d	0.340c	0.326bc	0.361ab	0.341b
30	0.162de	0.146d	0.169b	0.184cde	0.200b	0.240c	0.234b	0.250bc	0.279bc	0.240c	0.297c	0.326c	0.292c	0.319b	0.306c
40	0.179bcd	0.175abc	0.141b	0.204bc	0.159ef	0.186g	0.206cd	0.250bc	0.244ef	0.265b	0.300c	0.304c	0.344b	0.311b	0.357b
50	0.155f	0.144d	0.169b	0.186cde	0.173de	0.220ef	0.210c	0.234cd	0.259de	0.234c	0.283d	0.306c	0.314bc	0.333b	0.333b

注: 同一列不同字母表示 $p < 0.05$, 划线数据为土层中水分含量最大处。

2.2 冻融作用对土壤速效磷垂直迁移的影响

冻融条件下土壤速效磷垂直分布见表 2。1 次冻融循环后, 初始含水率为 20%, 30% 和 40% 土壤的速效磷最大含量分别在 15 cm, 7 cm 和 15 cm 处, 为 54.05 mg/kg, 55.17 mg/kg, 51.97 mg/kg。经过 5 次冻融循环后, 土壤速效磷含量分别在 7 cm, 7 cm 和 10 cm 处达到最大, 为 49.05 mg/kg, 46.20 mg/kg 和 49.56 mg/kg。经过连续 30 次冻融循环后土壤速效磷含量均在 3 cm 处达到最大, 分别为 43.97 mg/kg, 45.06 mg/kg 和 43.38 mg/kg。各层土壤平均速效磷含量也在 3 cm 处最大, 为 42.19 mg/kg。经过冻融循环后, 土壤速效磷最大含量与其他各层达到了显著差异(除 40% 的 20 FTCs 和 30 FTCs)。以上分析得出冻融循环使土壤下层速效磷向上层运移, 多次冻融循环作用后向表层聚集。

盐随水走, 这是盐分在土壤中迁移的主要方式, 因此影响水分迁移的因素也会影响盐分的迁移^[11]。在冻结期, 土壤冻结层从表层向下延伸, 下层未冻土壤中磷素在毛管水作用下由水势较大的未冻层向冻结层迁移, 形成向上运移趋势。冻融期, 土壤开始由表层解冻, 尚未融化的冻层起到隔水作用, 不但阻止顶部融水向下层渗透, 而且隔断了与下层水的联系; 同时土壤冻结层以上消融水分向表层迁移蒸发, 水中速效磷也随着水分向表层迁移^[12]; 温度升高也会增加磷素的吸附作用^[13], 因此解冻时溶液中速效磷会重新吸附于土壤, 这都导致土壤速效磷在土壤解冻时随着水分返迁量少于冻结时向上迁移的量, 所以经过

30 次冻融循环作用后使得土壤最大速效磷含量分别由 15 cm, 7 cm 和 15 cm 层迁移至了 3 cm 层, 与土壤水分的变化趋势相似, 对各层土壤含水率与速效磷含量进行相关性分析, $r = 0.268$, $p = 0.001$, 达到了极显著相关。冻融循环作用使得土壤磷素随土壤水分由土壤下层向表层迁移, 这使得春季融雪侵蚀加剧了养分的流失, 同时也会导致土壤次生盐渍化。

土壤初始含水率不同会影响速效磷的垂直迁移, 由图 1 所示, 初始含水率为 20%, 30% 和 40% 时, 经过多次冻融循环后速效磷平均含量最大值分别为 42.0 mg/kg, 42.9 mg/kg 和 43.9 mg/kg, 最小值分别为 39.0 mg/kg, 39.6 mg/kg 和 41.2 mg/kg。由此可知, 随着土壤含水率增加, 冻融作用后土壤速效磷含量有增加趋势。这是因为土壤含水率高, 增大了速效磷的溶解性, 在冻融作用下随着土壤水分向上迁移的量增加; 土壤高含水率在发生冻胀作用后对土壤影响更大, 因为黑土包含大量 2:1 膨胀型黏土矿物, 增大了矿物晶格破坏后对磷释放的趋势, 从而增加了速效磷的含量^[14]; 土壤对磷的吸附主要通过静电引力的非专性吸附和配位体交换的专性吸附, pH 值大小会影响土壤对磷的吸附, 初始含水量增大会增加 pH 值, 正电荷减少, 降低了土壤对磷的吸附能力^[12], 所以冻融循环后相对于低含水率土壤速效磷含量较高, 土壤含水量大小影响速效磷迁移量。

不同冻融循环次数条件下土壤速效磷垂直迁移变化见图 2。随着冻融循环次数增加, 土壤速效磷含量逐渐降低, 且在 0—20 cm 层波动较大。土壤对磷的吸附表现出开始时为快速吸附过程^[15], 1 次冻融作用后, 速效磷的含

量减少为 50.63 mg/kg,30 次冻融循环后为 43.81 mg/kg,较 1 次冻融后减少了 13.5%。随着冻融循环次数的增加,延长了速效磷与土壤胶体的接触时间,增加了胶体对速效磷的吸附量,土壤速效磷含量逐渐降低;冻融作用可以增加游离氧化铁的含量,而磷的吸附能力与铁、铝氧化物含量呈正相关^[16],所以降低了速效磷的有效性;另外随着冻融循环次数增加,冻胀作用破坏了土壤结构,增加了土壤颗粒比表面积,增大了磷的吸附电位,也降低了磷的有效

性,但随着这些吸附电位的饱和,速效磷含量减少速率也在降低^[17]。多次冻融循环使得土壤本身吸持量、承载量均达到饱和,土壤速效磷吸附量与溶液中速效磷呈现动态平衡的趋势,所以含量趋于稳定。由图 2 可知随着冻融循环次数的增加,土壤速效磷最大含量逐渐向表层移动,这与以上的分析结果相同。冻融循环会影响土壤速效磷的有效性,降低磷素等营养物质的植物利用率,从而影响生态系统生产力。

表 2 冻融条件下土壤速效磷垂直分布 mg/kg

土层 深度/cm	20%					30%					40%				
	1FTC	5FTCs	10FTCs	20FTCs	30FTCs	1FTC	5FTCs	10FTCs	20FTCs	30FTCs	1FTC	5FTCs	10FTCs	20FTCs	30FTCs
1	43.97c	43.05b	38.53b	37.37b	37.53b	44.78b	40.21b	36.66b	38.01b	39.6b	43.72bc	42.02c	44.61b	41.86a	42.91ab
3	43.25c	40.93b	35.77b	44.41b	43.97a	45.10b	40.70b	36.09b	39.44b	45.06a	43.08c	46.21b	42.87b	42.53a	43.38a
5	43.61c	41.25b	36.13b	37.21a	39.53a	46.41b	40.41b	43.06a	40.05a	39.60b	45.58bc	42.57c	48.96a	40.46a	41.77bc
7	43.81c	49.05b	41.89a	37.45b	37.85b	55.17a	46.20a	36.91b	38.42b	38.25b	43.25bc	41.86c	43.12b	41.52a	40.92c
10	44.37c	45.73a	36.05b	37.21b	37.53b	47.47b	39.76b	36.75b	37.72b	38.70b	43.67bc	49.56a	43.12b	41.39a	41.47c
15	54.05a	40.97b	36.21b	37.09b	37.89b	45.88b	40.46b	36.09b	37.52b	38.25b	51.97a	42.02c	43.46b	39.15bc	39.70d
20	48.37b	41.13b	36.25b	37.13b	37.25b	44.17b	43.47b	36.05b	38.42b	38.62b	47.40b	41.98c	43.72b	38.17bc	39.15de
30	45.41bc	42.25b	36.97b	38.69b	37.37b	45.51b	40.41b	38.09b	36.70b	37.68b	44.18bc	42.02c	42.91b	38.30bc	39.70d
40	43.61c	41.69b	37.41b	37.21b	37.29b	44.90b	40.94b	36.17b	37.44b	37.28b	44.73bc	41.69c	44.65b	38.89c	38.68de
50	43.81c	41.57b	37.49b	37.13b	37.97b	46.00b	42.33b	36.54b	36.70b	37.81b	43.67bc	42.15c	43.63b	38.43c	38.39e

注:同一列不同字母表示 $p<0.05$,划线数据为土层中速效磷含量最大处。

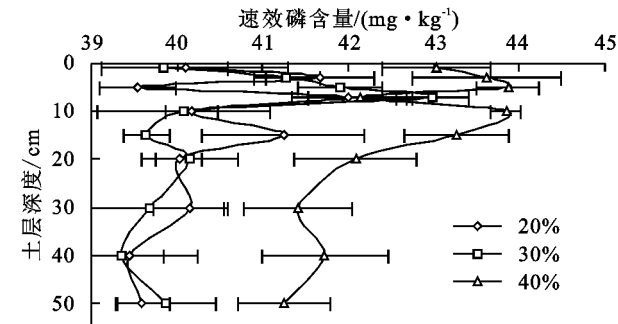


图 1 不同含水率条件下速效磷垂直迁移变化

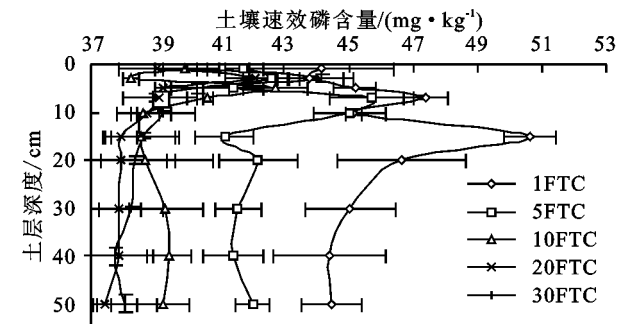


图 2 不同冻融循环次数条件下速效磷垂直迁移变化

2.3 土壤速效磷与水分相关性分析

从冻融作用对土壤水分和速效磷垂直迁移的影响可以看出水分运动是影响土体速效磷迁移的主要因素。由表 1 和表 2 可以看出,土壤速效磷和水分具有相似的迁移规律,达到极显著正相关,特别是土层含水率最大值与速效磷浓度最大值的迁移规律一致。冻融循环条件下,影响速效磷和水分垂直分布的因素很多,且各种因素之间存在交互作用,使得土壤速效

磷和水分垂直迁移特性更为复杂。考虑各个因素对土壤速效磷和水分垂直迁移的影响,利用 SPSS 19.0 软件对试验所得结果进行回归分析,结果如下:

$$Y=0.1170.015X_1+0.002X_2-0.040X_3+1.287X_1^2-4.885\times10^{-5}X_2^2+0.036X_3^2-0.124X_1X_3+0.001X_2X_3+0.001X_1X_2\quad(R^2=0.892)\quad(1)$$

$$Z=52.134-52.128X_1-0.820X_2-0.039X_3+102.890X_1^2+0.019X_2^2+3.616X_3^2-10.128X_1X_3-0.191X_2X_3+0.256X_1X_2\quad(R^2=0.578)\quad(2)$$

式中:Y 为含水率;Z 为速效磷浓度(mg/kg);X₁ 为初始含水率;X₂ 为冻融循环次数(次);X₃ 为土层深度(m)。

由式(1)可以看出,土壤含水率与初始含水率、冻融循环次数和土层深度之间均呈二次抛物线关系,影响土壤含水率分布特征的各因素之间存在着不同程度的交互作用。很明显,在冻融作用下,土壤初始含水率对土柱含水率有促进作用,而土层深度可在一定范围内对含水率有抑制作用,随着土层深度的增加含水率呈现逐渐减小的趋势。因此在实际应用中这些因素之间的相互作用规律,在一定程度上可预测初始含水率为 X₁ 的土层,经过 X₂ 次续冻融循环后,土层深度为 X₃ 处的土壤含水率。

由式(2)可知,土壤速效磷浓度与初始含水率、冻融循环次数和土层深度之间的相关系数较低,回归系数不能准确地描述各因素与速效磷浓度之间的相关关系。

为进一步了解水分迁移对土壤速效磷运移的影响,对不同冻融循环次数和不同初始含水率条件下的含水率和速效磷浓度平均值(表1和表2)进行回归分析:

$$P=20.54+82.06X \quad (R^2=0.910) \quad (3)$$

式中: P 表示速效磷浓度(mg/kg); X 代表含水率。

由式(3)可知,土壤速效磷浓度与含水率呈现正相关关系。通过式(1)与式(3)得出的含水率和速效磷浓度(即预测结果)和在不同初始含水率、冻融循环次数和土层深度条件下的含水率和速效磷浓度(即实测结果)进行检验。结果发现,含水率实测结果和预测结果的相关系数高达0.942,且 $p<0.001$,均值仅差0.004,说明预测结果较好。但速效磷实测结果和预测结果的均值为0.347 mg/kg,相关系数较低,仅为0.205,且 $p=0.012>0.001$,说明预测结果不够理想。主要原因可能是影响土壤速效磷迁移的因素较含水率复杂。不仅含水率影响土壤速效磷迁移,而且土壤冻融作用通过改变pH值、有机质含量和微生物活性等土壤性质,进而改变磷素赋存形态和土壤磷吸附—解吸特性,影响土壤速效磷迁移量。目前,在单因素作用下磷素的迁移过程取得了成果,现有的理论模型都是通过室内进行模拟试验利用数理统计、正交回归分析而建立,对实际问题起到一定的指导意义。但在大多数情况下却不能按单因素的大小进行评判,磷素迁移是各种因素交互作用下的结果,因此要进行综合评判,方能得出符合实际的结论。因此,应继续加强磷素迁移模拟的研究以建立完善的磷素预报模型。

3 结论

(1) 冻融循环作用使土壤水分由土壤下层向表层迁移,虽土壤初始含水率不同,但经过30次的冻融循环后,土壤最大含水率均出现在3 cm层。

(2) 土壤冻融过程中水分迁移导致速效磷的重新分布,随着冻融循环次数的增加,速效磷逐渐向土壤表层迁移,1次冻融循环后,离表层7~15 cm处出现了速效磷浓度的最大值,经过连续30次冻融循环后,土壤速效磷浓度最大值逐渐迁移至离表层3 cm处。

(3) 土壤初始含水率越高,冻融循环后随水分向土壤表层迁移的速效磷越高,但随着冻融循环次数增加,土壤各层速效磷含量都有所下降。1次冻融作用后,土壤速效磷的最高含量为50.63 mg/kg,30次后最高含量为43.81 mg/kg,减少了13.5%。

(4) 利用多元统计分析方法分别将冻融循环后土壤含水率和速效磷与初始含水率、冻融循环次数和土层深度进行回归分析,其中含水率预测结果与实测

结果相差不大,相关系数为0.942,由于磷素迁移的复杂性,速效磷浓度预测结果与实测结果差异较大,相关系数仅为0.205。

参考文献:

- [1] 王洋,刘景双,王国平,等.冻融作用与土壤理化效应的关系研究[J].地理与地理信息科学,2007,23(2):91-96.
- [2] 周旺明,王金达,刘景双,等.冻融及枯落物对湿地土壤淋溶液的影响[J].中国环境科学,2008,28(10):927-932.
- [3] Hinman W C. Effects of freezing and thawing on some chemical properties of three soils[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1970,50(2):179-182.
- [4] Oztas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability[J]. Catena, 2003, 52(1):1-8.
- [5] Vaz M D R, Edwards A C, Shand C A, et al. Changes in the chemistry of soil solution and acetic-acid extractable P following different types of freeze/thaw episodes [J]. European Journal of Soil Science, 1994, 45(3): 353-359.
- [6] 徐学祖,邓友生.冻土中水分迁移的试验研究[M].北京:科学出版社,1991.
- [7] 张殿发,王世杰.土地盐碱化过程中的冻融作用机制[J].水土保持通报,2000,20(6):14-17.
- [8] 中国土壤学会.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2002:68-86.
- [9] 郭占荣,荆恩春,聂振龙,等.冻结期和冻融期土壤水分运移特征分析[J].水科学进展,2002,13(3):298-302.
- [10] 杨广云,阴法章,刘晓凤,等.寒冷地区冻土水文特性与产流机制研究[J].水利水电技术,2007,38(1):39-42.
- [11] 张殿发,郑琦宏,董志颖.冻融条件下土壤中水盐运移机理探讨[J].水土保持通报,2005,25(6):14-18.
- [12] 张殿发,郑琦宏.冻融条件下土壤中水盐运移规律模拟研究[J].地理科学进展,2005,24(4):46-55.
- [13] 邵兴华,张建忠,洪森荣,等.土壤中影响磷吸附因素研究进展[J].安徽农业科学,2007,35(12):3609-3611.
- [14] 王风,朱岩,陈思,等.冻融循环对典型地带土壤速效氮磷及酶活性的影响[J].农业工程学报,2013,29(24): 118-123.
- [15] Maguire R O, Sims J T, Foy R H. Long-term kinetics for phosphorus sorption-desorption by high phosphorus soils from Ireland and the Delmarva peninsula USA. [J]. Soil Science, 2001,166(8):557-565.
- [16] Hartikainen, H. Phosphorus and its reactions in terrestrial soils and lakes ediments[J]. SciAgricSocFinl, 1979,51:537-624.
- [17] 钱多,范昊明,周丽丽,武敏,郭萍.冻融作用对棕壤磷素吸附—解吸特性的影响[J].水土保持学报,2012,26(2):279-283